Основные принципы построения астрокорректора для внутриатмосферных летательных аппаратов

Р.В. Бессонов, Б.С. Жуков, Е.С. Караваева, Т.В. Кондратьева, В.Е. Шевелев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: wokolajm@mail.ru

В статье рассмотрен принцип построения астровизирующего устройства для внутриатмосферных летательных аппаратов, заключающийся в обоснованном выборе оптимальных характеристик элементов оптической системы с учётом конкретных условий применения. Сложность астрокоррекции в условиях атмосферы заключается в высоком уровне фонового излучения неба в дневное время суток. Рассеянный свет дневной атмосферы затрудняет обнаружение и распознавание звёзд на кадре. Кроме того, негативное влияние на процесс вычисления астропоправок оказывает динамика летательного аппарата. На примере трёх характерных астрокамер разработки ИКИ РАН приведены конкретные конструктивные и алгоритмические решения, позволяющие в значительной мере преодолеть влияние негативных факторов, связанных с условиями применения астрокорректора, и обеспечить его работу на высотах от 10 до 30 км над уровнем моря при угловой скорости носителя до 9 град/с. Проведены расчёты габаритов оптической системы, отношения сигнал/шум и уровня фона на кадре, максимально допустимой угловой скорости носителя, рабочего времени экспозиции. Представлены результаты экспериментального исследования макетов астрокамеры в обсерватории ИКИ РАН.

Ключевые слова: астрокамера, астровизирующее устройство, внутриатмосферные летательные аппараты, выбор параметров оптической системы

Одобрена к печати: 23.11.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-21-30

Астровизирующее устройство (ABУ) предназначено для круглосуточной астрокоррекции ошибок бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), которые имеют свойство накапливаться со временем. Наличие высокоточного круглосуточного ABУ сегодня актуально для совершенно различных объектов применения. Это объясняется тем, что ABУ может обеспечить автономную от систем спутниковой навигации астрокоррекцию ошибок БИНС. В данной работе рассмотрен принцип построения внутриатмосферных ABУ.

Основные проблемы построения внутриатмосферных ABУ связаны с необходимостью осуществлять астрокоррекцию в условиях значительных угловых колебаний носителя и высокого уровня фона, вызванного рассеянным светом дневной атмосферы. Диапазон высот применения ABУ — от 10 до 30 км над уровнем моря. Снизу он ограничен высотой облачного покрова. Выше 30 км задачу астрокоррекции могут выполнять звёздные датчики космического применения.

Варианты оптической системы АВУ

Классическая оптическая система (OC) приборов звёздной ориентации строится на основе фотоприёмного устройства, объектива и бленды. В качестве фотоприёмного устройства рассмотрена современная быстродействующая 20-Мпиксельная КМОП-матрица с размером пикселя 6,4×6,4 мкм. Выбор объектива сводится к выбору фокусного расстояния и относительного отверстия. В качестве объективов рассматриваются три характерных объектива производства АО «ЛОМО». Определённая комбинация матрицы и объектива задаёт фотометрические характеристики ОС АВУ и формирует облик астрокамеры (АК). Рассмотрим взаимосвязь параметров оптической системы с условиями применения внутриатмосферных АВУ на примере трёх астрокамер: АК 36/1,2/20М, АК 60/1,4/20М, АК 125/4/20М (*puc. 1*, см. с. 22, *табл. 1*). Диаметры кружка исправленного изображения различных объективов в проекции на матрицу представлены на *puc. 2*.

Параметр	AK 36/1,2/20M	AK 60/1,4/20M	AK 125/4/20M
Фокусное расстояние объектива, мм	36	60	125
Относительное отверстие объектива	1,2	1,4	4
Матрица	КМОП, 20 Мпиксель		
Угловой размер пикселя, угл. с	36,7	22,0	10,6
Угловое поле зрения 2w, град	26,6	24,8	18,6

Таблица 1. Основные характеристики трёх вариантов ОС АВУ



Рис. 1. 3D-модели астрокамер для ABУ. *Слева направо*: AK 36/1,2/20M, AK 60/1,4/20M, AK 125/4/20M





Влияние уровня фона

Возможность регистрации звёзд на изображении участка небесной сферы и точность определения параметров ориентации по этим снимкам зависят от отношения полезного сигнала от звезды к шуму фона. Основной вклад в шумовую составляющую уровня фона вносит рассеянный свет дневной атмосферы. Его яркость быстро уменьшается с увеличением высоты над уровнем моря (*puc. 3*).

Для борьбы с высоким уровнем фона могут быть применены следующие решения:

- Выбор оптической системы астрокамеры, обеспечивающей достаточное отношение полезного сигнала от звезды к шуму фона дневного неба для конкретных высот применения.
- Использование в оптической системе ABУ светофильтра, отрезающего коротковолновую составляющую рассеянного излучения атмосферы до 0,7 мкм.
- Применение в программном обеспечении прибора метода цифрового накопления. Данный метод позволяет повысить отношение сигнал/шум в изображениях звёзд при цифровом сложении (усреднении) серии кадров и совмещении их по априорной информации от БИНС.

Для сравнения яркости неба с сигналом звёзд находилась эквивалентная звёздная величина неба m_V так, чтобы количество фотоэлектронов, накопленных в одном пикселе при наблюдении неба, равнялось интегральному количеству фотоэлектронов, приходящих на фотоприёмную матрицу при наблюдении звезды величины m_V (учитывая, что изображение звезды может занимать несколько пикселей).



Рис. 3. Спектральная яркость неба при наблюдении в зенит в зависимости от высоты съёмки при зенитном угле Солнца $\theta_s = 40^\circ$ (красные сплошные линии) и при $\theta_s = 87^\circ$ (синяя пунктирная линия); расчёты проведены по модели MODTRAN-4

Количество фотоэлектронов в одном пикселе при наблюдении неба равно:

$$I_{sky} = S_{ob} \left(\frac{px}{f}\right)^2 \eta T_{exp} B_{sky}, \qquad (1)$$

где S_{ob} — площадь входного зрачка объектива; η — произведение квантовой эффективности и прозрачности объектива (предполагаются постоянными по спектральной зоне); T_{exp} — время экспонирования; f — фокусное расстояние объектива; px — размер пикселя; $b_{sky}(\lambda)$ и $B_{sky} = \int b_{sky}(\lambda) d\lambda$ — спектральная и зональная яркость неба, интегрирование проводится

по спектральной зоне АК шириной $\Delta \lambda$.

Интегральное количество фотоэлектронов при наблюдении звезды со звёздной величиной *m*, равно:

$$I_{star} = S_{ob} \eta T_{exp} \cdot 10^{-0.4m_v} F_{star,0},$$

где $f_{star,0}(\lambda)$ и $F_{star,0} = \int_{\Delta\lambda} f_{star,0}(\lambda) d\lambda$ — спектральный и зональный потоки излучения звезды

с нулевой звёздной величиной.

Отсюда эквивалентная звёздная величина неба равна:

$$m_{v} = 2,5 \cdot \log_{10} \left| \frac{F_{star,0}}{\left(px/f \right)^{2} B_{sky}} \right|$$

Вычисление потока излучения звёзд с нулевой звёздной величиной производилось с учётом рабочего спектрального диапазона ABV 0,7–1 мкм для звёзд спектрального класса К.

Полученные в результате эквивалентные звёздные величины неба для трёх вариантов ОС АВУ приведены в *табл. 2*.

Высота, км	AK 36/1,2/20M	AK 60/1,4/20M	AK 125/4/20M
0	-3,38	-1,94	-0,68
10	-0,17	1,27	2,54
20	1,26	2,70	3,97
25	2,46	3,90	5,16
30	3,31	4,75	6,01

Таблица 2. Эквивалентная звёздная величина неба т.,

Определим отношение сигнал/шум в изображении звезды как:

сигнал/шум =
$$\frac{E_{star}}{3E_{noise}}$$
,

где E_{noise} — средний уровень случайного шума на одиночном кадре (E_{noise} = 50 EMP при уровне фона E_v = 3000 EMP по результатам экспериментальной съёмки. Значения приведены в единицах младшего разряда при использовании 12-битного АЦП); E_{star} — интегральная яркость звезды.

Величина E_{star} рассчитывается из соотношения:

$$E_{star} = \frac{E_v}{2,512^{m_{star}-m_v}},$$

где E_v — среднее значение уровня фона при дневной съёмке на КМОП-матрице $(E_v = 3000 \text{ EMP}); m_{star}$ — минимальная звёздная величина, которую должен распознавать

прибор для корректного определения ориентации (для AK $36/1,2/20M - m_{star} = 5,2$; для AK $60/1,4/20M - m_{star} = 5,9$; для AK $125/4/20M - m_{star} = 6,4$).

Результаты расчёта отношения сигнал/шум по одному кадру и при использовании алгоритма цифрового накопления 30 кадров приведены в *табл. 3* и 4 соответственно.

Высота, км	AK 36/1,2/20M	AK 60/1,4/20M	AK 125/4/20M
0	0,01	0,01	0,03
10	0,1	0,3	0,6
20	0,5	1,1	2,1
25	1,6	3,2	6,4
30	3,5	6,9	14

Таблица 3. Отношение сигнал/шум для одиночного кадра

Таблица 4. Отношение сигнал/шум после усреднения 30 кадров при работе в режиме цифрового накопления

Высота	AK 36/1,2/20M	AK 60/1,4/20M	AK 125/4/20M
0	0,0	0,1	3,9
10	0,7	1,4	76,4
20	2,7	5,2	285,1
25	8,0	15,8	853,1
30	17,5	34,7	1866,4

Для реализации алгоритма определения ориентации по изображению участков звёздного неба эмпирически показано, что отношение сигнал/шум должно быть больше 5 (соответствующие ячейки в таблицах выделены цветом). Как видно из приведённых выше результатов, по одиночному кадру практически невозможно определить ориентацию в дневное время суток даже на большой высоте, поэтому необходимо использовать режим цифрового накопления. При усреднении *n* кадров, шум на кадре уменьшается в \sqrt{n} раз, что значительно увеличивает отношение сигнал/шум. Так, например, при сложении 30 кадров AK 125/4/20M может быть использована на высотах от 10 км, AK 60/1,4/20M — на высотах от 20 км, AK 36/1,2/20M —

Влияние угловой скорости

Одной из важных проблем, возникающих при визировании звёзд, является влияние динамики объекта применения на качество полученных снимков. При высокой угловой скорости в момент экспонирования возникает эффект «смаза» — распределение полезного сигнала от звезды на несколько пикселей. Это приводит к смещению энергетического центра изображения звезды и уменьшению отношения сигнал/шум в режиме цифрового накопления. Всё это негативно влияет на точность определения ориентации и на помехозащищённость алгоритма определения ориентации. Максимально допустимая угловая скорость объекта применения в момент съёмки зависит от углового размера пикселя и допустимого количества пикселей в смазе на изображении звезды, полученном за время экспонирования:

$$w = \frac{\alpha_{px} N_{px}}{T_{exp}},$$

где α_{px} — угловой размер пикселя; N_{px} — количество пикселей в смазе; T_{exp} — рабочее время экспозиции.

на высотах от 25 км и выше.

Экспериментально показано, что количество пикселей в смазе должно быть не более 6 для корректной работы бортового алгоритма.

Выбор рабочего времени экспозиции, при котором будет производиться съёмка участков звёздного неба, является ещё одной важной задачей, которую необходимо решить при проектировании ABУ. Время экспозиции должно быть достаточным для регистрации сигнала от тусклых звёзд, но при этом нельзя допустить засветки матрицы при съёмке дневного неба. Для удобства и надёжности работы астрокамеры предлагается использовать одинаковое и постоянное рабочее время экспозиции независимо от времени суток. Был проведён сравнительный расчёт времени экспозиции для трёх вариантов ОС ABУ. На основе сравнительных коэффициентов, а также экспериментально полученного $T_{exp \ 60} = 5$ мс для астрокамеры AK 60/1,4/20M было рассчитано рабочее время экспозиции для остальных астрокамер. Результаты расчёта рабочего времени экспозиции и максимально допустимой угловой скорости приведены в *табл. 5*.

Параметр	AK 36/1,2/20M	AK 60/1,4/20M	AK 125/4/20M
Угловой размер пикселя, угл. с	36,7	22	10,6
Рабочее время экспозиции, мс	6	6	18
Угловая скорость, град/с	9,7	5,9	1,0

Таблица 5. Время экспозиции и максимальная угловая скорость

Таким образом, при выборе ОС АВУ необходимо учитывать динамику объекта применения. АК 36/1,2/20М и АК 60/1,4/20М могут выполнять требования назначения при больших угловых колебаниях носителя. Для менее динамичных объектов применения следует использовать АК 125/4/20М.

Более комплексную оценку применения каждой из рассматриваемых астрокамер даёт понимание взаимосвязи таких параметров, как максимально допустимая угловая скорость объекта применения, угловой размер пикселя и уровень яркости фона на кадре (*puc. 4*).

Из-за необходимости обеспечения работы астрокорректора днём важно оценить и сравнить уровень фона на кадре для трёх астрокамер при одинаковой внешней освещённости. Световая энергия излучения фона, накапливаемая в пикселе за время экспозиции, пропорциональна площади пикселя, площади входного зрачка объектива и обратно пропорциональна квадрату фокуса объектива (1).



Рис. 4. Зависимость углового размера пикселя (диаметр круга) от уровня фона и допустимой угловой скорости

Угловой размер пикселя определяется составом оптической системы, а именно выбором матрицы и объектива, и влияет непосредственным образом на точность расчёта параметров ориентации. Так как координаты взвешенного центра изображения звезды вычисляются бортовым алгоритмом в долях пикселя, уменьшение углового размера пикселя приводит к уменьшению погрешности расчёта ориентации.

Астрокамеры АК 36/1,2/20М и АК 60/1,4/20М могут работать при больших угловых скоростях, однако имеют высокую чувствительность к фоновому излучению, что негативно влияет на помехозащищённость алгоритма определения ориентации в дневное время суток. Камера АК 125/4/20М обладает относительно низкой угловой скоростью применения, но при этом хорошей помехозащищённостью и высокой точностью определения ориентации, так как имеет самый маленький угловой размер пикселя.

Результаты экспериментального исследования

Эксперимент проходил в обсерватории ИКИ РАН. Были проведены съёмки звёздного неба двумя макетами астрокамер: АК 60/1,4/20М и АК 125/4/20М (Эльяшев и др., 2017). Каждым прибором выполнены две серии съёмок: ночью и на рассвете. Съёмка на рассвете необходима для имитации работы АВУ в дневное время суток. Эксперимент проводился при зенитном угле Солнца 87°, при котором при наблюдении с поверхности Земли обеспечивалась такая же яркость неба, как и при наблюдении с высоты 10 км при зенитном угле Солнца 40° (см. *рис. 1*).

Полученные кадры были обработаны специальным программным обеспечением, которое реализует алгоритм цифрового накопления серии из заданного числа кадров и осуществляет фильтрацию, локализацию, распознавание звёзд, вычисление их координат в инерциальной системе координат.

В результате эксперимента была доказана возможность применения рассмотренных выше приборов в качестве астрокорректора для внутриатмосферных летательных аппаратов. Все указанные приборы успешно справились с задачей локализации и распознавания требуемого для расчёта ориентации числа звёзд.

Одной из важных задач данного эксперимента было определение рабочего времени экспозиции. Экспериментально полученное рабочее время экспозиции для AK 60/1,4/20M составило 5 мс, для AK 125/4/20M - 10 мс. Эти значения достаточно хорошо коррелируются с расчётом (см. *табл. 5*), а для AK 125/4/20M время экспозиции оказалось даже меньше расчётного, что позволит увеличить допустимую угловую скорость объекта применения до 1,8 град/с.

Габариты астрокамеры

Для оценки оптимального варианта ОС АВУ по критерию снижения массово-габаритных характеристик необходимо в первую очередь оценить габаритные размеры бленды. Бленда предназначена для подавления боковой засветки от солнца а также от элементов конструкции изделия применения и самого АВУ. Был проведён расчёт минимально допустимого размера бленды для разных вариантов ОС АВУ.

Предварительный расчёт габаритов бленды производился графическим методом в соответствии с *puc. 5* (см. с. 28) путём нахождения точки пересечения двух прямых y_1 и y_2 по формулам:

$$y_1 = \frac{2f}{a} \left(x - \frac{d}{2} \right), \quad y_2 = tg(90 - \alpha) \left(x + \frac{d}{2} \right) + f,$$

где d — диаметр первой линзы объектива; a — размер матрицы; α — угол засветки солнца; f — фокусное расстояние объектива.



Рис. 5. Условное изображение оптической схемы АВУ для расчёта минимально допустимых габаритов бленды



Рис. 6. Габаритные эскизы трёх астрокамер. *Слева направо:* AK 36/1,2/20M, AK 60/1,4/20M, AK 125/4/20M

Результаты расчёта габаритов бленды, обеспечивающих отсутствие в угловом поле зрения астрокамеры (2 β) солнечных лучей, направленных под углом $\alpha = 40^{\circ}$ к оптической оси прибора, приведены в *табл. 6*.

После предварительной оценки габаритов бленды была проведена более детальная проработка конструкции трёх астрокамер (*puc. 6, табл. 7*).

Таблица б	Рассчитанные	габариты бленды
-----------	--------------	-----------------

Параметр	AK 36/1,2/20M	AK 60/1,4/20M	AK 125/4/20M
Диаметр бленды, мм	54	75	74
Высота бленды, мм	50	71	79

Таблица 7. Габаритные размеры АК

Параметр	AK 36/1,2/20M	AK 60/1,4/20M	AK 125/4/20M
Ширина, мм	120	120	150
Высота, мм	160	230	295
Масса, кг	1,2	1,8	3

При жёстком ограничении по массово-габаритным характеристикам прибора возможно создание малогабаритного ABУ на базе короткофокусной астрокамеры AK 36/1,2/20M.

Выводы

При проектировании внутриатмосферных ABУ перед разработчиком стоит сложная задача поиска компромисса между габаритами астрокамеры, точностью решения задачи ориентации, помехозащищённостью бортового алгоритма и максимальной скоростью объекта применения. На *рис.* 7 наглядно продемонстрировано, что идеального прибора, одновременно обладающего оптимальными значениями всех вышеперечисленных характеристик, не существует. Но, зная взаимосвязь таких параметров, как фокусное расстояние, относительное отверстие, габариты оптической системы и время экспозиции, можно создавать астрокамеры, адаптированные для различных условий применения с точки зрения высоты полёта и диапазона угловых скоростей летательного аппарата.

В качестве основы для построения АВУ могут быть использованы следующие астрокамеры: АК 36/1,2/20М, АК 60/1,4/20М, АК 125/4/20М. Данные приборы сочетают в себе отработанные в космосе надёжные конструктивные решения, с одной стороны, и современные КМОП-технологии в совокупности с уникальными алгоритмами — с другой.

На сегодняшний день силами ИКИ РАН и смежных организаций создан бесплатформенный прибор АВУ-Ювелир, который успешно зарекомендовал себя в ходе лётно-конструкторских испытаний. В настоящее время ведётся разработка АВУ нового поколения, который будет построен на базе двух АК 125/4/20М.





Литература

1. Эльяшев Я.Д., Брысин Н. Н., Бессонов Р.В., Прохорова С.А., Сметанин П. С., Форш А.А. Перспективы развития астровизирующих устройств (ABУ) на основе широкоформатных приёмников изображения типа ACTIVE-PIXEL SENSOR (APS) // 5-я Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса, 5–8 сент. 2016. М: ИКИ РАН, 2017. С. 110–118.

The basic principles of design of astrocorrector for endoatmospheric vehicles

R. V. Bessonov, B. S. Zhukov, E. S. Karavaeva, T. V. Kondratieva, V. E. Shevelev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: wokolajm@mail.ru

The principle of construction of star tracker for endoatmospheric air vehicles, namely the reasonable choice of optimal characteristics for optical system components, taking into account the specific conditions of use is considered. The complexity of astrocorrection in the atmosphere is due to high level of the sky background radiation in the daytime. The diffused light of the daytime atmosphere complicates the detection and identification of stars in the frame. In addition, the dynamics of the vehicle has the negative impact on the process of computing astrocorrections. The specific structural and algorithmic solutions that allow to mostly overcome the influence of negative factors associated with the conditions of astrocorrector use and ensure its operation at altitudes from 10 to 30 km above sea level and the angular speed of the carrier up to 9 deg/s are given on the example of three characteristic stellar cameras developed at IKI RAS. The calculations of the optical system dimensions, the signal-to-noise ratio and the background level on the frame, as well as of the maximum allowable angular velocity of the carrier and the exposure time were made. The results of experimental study of stellar camera models at the IKI RAS observatory are presented.

Keywords: stellar camera, stellar tracker, endoatmospheric vehicles, the choice of optical system's parameters

Accepted: 23.11.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-21-30

References

Elyashev Ya. D., Brysin N. N., Bessonov R. V., Prokhorova S. A., Smetanin P. S., Forsh A. A., Perspektivy razvitiya astroviziruyushchikh ustroystv (AVU) na osnove shirokoformatnykh priyemnikov izobrazheniya tipa ACTIVE-PIXEL SENSOR (APS) (Prospects for the development of astrovising devices (AVU) based on wide-format receivers of the image type ACTIVE-PIXEL SENSOR (APS)), *5-ya Vserossyiskaya nauch-no-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov*", (5th All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), Proc., Tarusa, 5–8 Sept., 2016, Moscow: IKI RAS, 2017, pp. 110–118.